

Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales



2012

Tesis de Maestría

Emerson A. Parra Rodríguez I.A.

Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Escuela de Geociencias y Medio Ambiente

Facultad de Minas



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales

Emerson Arturo Parra Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2012

Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales

Emerson Arturo Parra Rodríguez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Tesis cofinanciada por:



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN



COLCIENCIAS
C O L O M B I A

Director:

M.Sc. Luis Fernando Carvajal S.

Línea de Investigación:

Estimación de Caudales Ecológicos Implementando Metodología Holística

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia

2012

Para Dora Inés

“Olvidamos que el ciclo del agua y el ciclo de la vida son uno mismo”.

Jacques Y. Cousteau.

Agradecimientos

Expreso mis sinceros agradecimientos a mi director de tesis Luis Fernando Carvajal Profesor asociado a la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por la paciencia e incondicional apoyo durante el desarrollo de la presente investigación, a pesar de los tropiezos que pudo haber en el camino. Al igual que a él, al profesor Juan Manuel Diez profesor investigador Universidad de Valladolid por su asesoría en los temas concernientes a la metodología “Instream Flow Incremental Methodology” (IFIM) y en general, a todos los profesores del Posgrado en Aprovechamiento Recursos Hidráulicos (PARH) que contribuyeron en mi formación como Magister en Recursos Hidráulicos.

De igual manera agradezco al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) por otorgarme la Beca de Joven Investigador, con la cual me pude concentrar y dedicar enteramente a la elaboración de este documento e igual forma a la empresa ISAGEN S.A., por el suministro de la información hidrométrica y ecológica sin la cual, no hubiese sido posible la elaboración de la presente tesis y a la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, mi alma máter, también le doy las gracias por su formación integral. A las personas y empresas que facilitan el desarrollo de herramientas computacionales, permitiendo el uso de sus programas de forma gratuita¹.

De manera especial quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a mi familia. A mi madre: Dora Inés por su constante apoyo y cariño.

Por último, les doy gracias a mis amigos, compañeros del (PARH) y de fuera de él quienes, me apoyaron y dieron ánimos durante el desarrollo de esta investigación, sino que en muchas ocasiones me ayudaron a salir de dudas o resolver algún problema.

Nuevamente, gracias a todos.

¹Este documento fue escrito con L^AT_EX, y la hidrología e hidráulica se utilizó HydroSIG v.3.1, Hec - Ras y PHABSIM 1.5

Resumen

La investigación presenta un proceso de planificación de siete pasos implementada en el Proyecto Trasvase Manso, ubicado en el Departamento de Caldas, Municipios de Samaná y Norcasia. En este estudio se involucran varios actores para satisfacer múltiples objetivos económicos, sociales y ecológicos. El proceso de siete pasos proporcionar un enfoque transparente y participativo hacia el logro de una visión común entre todas las partes interesadas. Esta metodología holística toma en cuenta la hidrología de la cuenca, el hábitat de idoneidad para la especie en peligro *Ichthyoelephas longirostris* y la capacidad instalada del la derivación del río Manso que alimenta el proyecto hidroeléctrico Miel I. El modelo PHABSIM muestra una mejor área ponderada útil con caudales mayores a $4 \text{ m}^3/\text{s}$ para el pez, sin embargo el tramo trasvase posee secciones donde el organismo objetivo puede sobrevivir con un grado de estrés durante periodos cortos de bajo caudal como $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Las simulaciones determinan que caudales menores de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ afectan considerablemente la pesca, refugio y el hábitat del pez. Se muestra los dos casos inherentes al proyecto Manso, el primero en donde el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en la resolución número 1673 de 2009, determinó un caudal de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ para el proyecto Manso y el segundo, donde la empresa ISAGEN S.A. en la revisión del caudal ecológico, manifiesta un caudal ecológico de $2 \text{ m}^3/\text{s}$. El resultado del mejor plan de generación esta dado por la conciliación de las partes interesadas. En la aceptación y estén de acuerdo con cada uno de los datos y pasos aquí mostrados.

Abstract

The research presents a planning process of seven steps implemented in the Manso Diversion Project, located in the Department of Caldas, Municipalities and Norcasia Samana. This study involved several actors to meet multiple economic, social and ecological. The seven-step process to provide a transparent and participatory approach towards achieving a common vision among all stakeholders. This holistic approach takes into account the catchment hydrology, habitat suitability for the endangered species *Ichthyoelephas longirostris* and the installed capacity of the derivation of the Manso River that feeds the Miel I hydroelectric project The model shows a better PHABSIM Weighted Usable area with flows greater than $4 \text{ m}^3/\text{s}$ for the fish, however the transfer section has sections where the target organism can survive with a degree of stress for short periods of low flow as $2 \text{ m}^3/\text{s}$. The simulations determine which flows under $2 \text{ m}^3/\text{s}$ significantly affect fisheries, shelter and habitat of the fish. It shows the two cases associated with the project Manso, the first where the Ministry of Environment, Housing and Territorial Development in Resolution 1673 of 2009, found a rate of $6 \text{ m}^3/\text{s}$ for the project and Manso the second, where the company ISAGEN SA in the review of the environmental flow, manifested an ecological flow of $2 \text{ m}^3/\text{s}$. The best result of the generation plan is given by the reconciliation of the parties concerned. In the acceptance and agree with each of the data and steps shown here.

Palabras claves: Manejo de la gestión del agua, Metodología holística, PHABSIM, Curvas de preferencia, *Ichthyoelephas longirostris*, Hidrología, Caudales ambientales ó ecológicos, Trasvase Manso.

Índice General

1. Generalidades	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
2. Metodología Propuesta	4
3. Algunos Métodos de Determinación de Caudal Ecológico	7
3.1. Introducción	7
3.2. Caudal ecológico	7
3.3. Métodos cuantitativos	8
3.3.1. Métodos hidrológicos o de caudales históricos	8
3.3.2. Métodos hidráulicos	10
3.3.3. Métodos simulación de hábitat	11
3.3.4. Métodos Holísticos	14
3.3.5. Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyecto licenciados	14
4. Hidrología	17
4.1. Introducción	17
4.2. Información disponible	17
4.2.1. Cartografía	17
4.2.2. Información hidrológica	18
4.3. Caudales máximos	19

4.3.1. Modelo digital de elevación (MDE) y parámetros morfométricos	19
4.3.2. Cálculo de los tiempos de concentración	20
4.3.3. Cálculo de caudales para diferentes periodos de retorno	20
4.3.4. Resultados	26
4.4. Caudales medios	29
4.4.1. Distribución espacial de la precipitación	31
4.4.2. Distribución espacial de la temperatura	32
4.4.3. Distribución espacial de la evapotranspiración	33
4.5. Caudales mínimos	37
4.5.1. Modelo de tanques	37
4.5.2. Análisis de frecuencias de series históricas	47
4.5.3. Regionalización de características medias	50
5. Aproximación a la Curva de Preferencia	52
5.1. Introducción	52
5.2. Conceptos	53
5.3. Enfoques Metodológicos	56
5.3.1. Estudio a nivel de individuos	56
5.3.2. Muestreo aleatorio de uso y disponibilidad	57
5.4. Estudios de Preferencia río Manso	58
5.5. Categoría I	58
5.5.1. Preferencia de Profundidad, Velocidad y Sustrato (tipo I)	58
5.6. Categoría III	60
5.6.1. Resultados de campañas	61
5.6.2. Sector de confluencia del río Manso con el río La Miel	62
5.6.3. Sector río Manso Remolinos	63
5.6.4. Sector río Manso La Punta	64
5.6.5. Sector río Manso La Risaralda	66
5.6.6. Sector río Manso Cadenales:	67
5.6.7. Sector río Manso La Samaria	69
5.6.8. Sector río Manso La Sonrisa	70

5.6.9. Sector río Manso Sitio De Desvío	71
5.6.10. Preferencia de Profundidad, Velocidad y Sustrato (tipo III)	73
6. Modelo PHABSIM	78
6.1. Introducción	78
6.1.1. Información hidráulica	79
6.1.2. Clasificación de Meso-Hábitats	82
6.1.3. Resultados del modelo PHABSIM	83
7. Economía de la región Manso	85
7.1. Introducción	85
7.1.1. Capacidad instalada	85
7.1.2. Operación comercial	86
7.1.3. Variación anual del caudal	88
7.1.4. Aspectos pesqueros	89
8. Análisis conjunto de la información	92
9. Conclusiones, Limitaciones y Recomendaciones	100
A. Hidrología	102
A.1. Hietogramas	103
A.2. Hidrográmas	108
B. Hidráulica	113
B.0.1. Sitio Trásvase	114
B.0.2. Sitio La Samaria	115
B.0.3. Sitio Cadenales	116
B.0.4. Sitio Risaralda	117
B.0.5. Sitio La Punta	118
B.0.6. Sitio Remolinos	119

Índice de Figuras

2.1. Figura tomada de Loucks et al, 2006	6
4.1. MDE de la zona de estudio	20
4.2. Tiempos de concentración en las cuencas de las subcuencas.	22
4.3. Curva intensidad-frecuencia-duración (IDF) para la estación Florencia.	23
4.4. Curva intensidad-frecuencia-duración (IDF) para la estación Belen-bosque.	24
4.5. Uso actual del suelo para la estimación del número de curva ponderado (CN) para la cuenca del río Manso.	25
4.6. Esquema de balance hidrológico sobre una cuenca	30
4.7. Mapa de precipitación promedio multianual (mm/año).	32
4.8. Mapa de temperatura media anual (°C).	33
4.9. Mapa de evapotranspiración real media por el método de Cenicafé.	35
4.10. Mapa de evapotranspiración real media por el método de Turc.	36
4.11. Esquema general del modelo.	39
4.12. Serie de caudales simulada y real Trasvase.	45
4.13. Curva de duración en el sitio del trasvase.	46
5.1. Curvas de disponibilidad de hábitat para velocidad.	59
5.2. Curvas de disponibilidad de hábitat para profundidad.	59
5.3. Curvas de disponibilidad de hábitat para sustrato.	60
5.4. Sitio desembocadura margen derecha arriba; margen izquierda abajo.	62
5.5. Río Manso en el sitio Remolinos	64
5.6. Río Manso en el sitio La Punta	65
5.7. Río Manso en el sitio La Punta	65
5.8. Río Manso en el sitio La Risaralda	66

5.9. Río Manso en el sitio La Risaralda aguas arriba	67
5.10. Río Manso en el sitio Cadenales aguas arriba	68
5.11. Río Manso en el sitio La samaria, en el área de confluencia de la quebrada La Mulata	69
5.12. Río Manso en el sitio La Sonrisa	70
5.13. Afloramiento rocoso imagen derecha; Barralateral de guijarros margen izquierda Puente San Diego	72
5.14. Río Manso en el sitio Puente San Diego	73
5.15. Curvas de disponibilidad de microhábitat para velocidad, profundidad y sustrato de río Manso.	74
5.16. Curvas de preferencia de microhábitat para velocidad, profundidad y sustrato de río Manso.	76
5.17. Ichthyoelephas longirostris (arriba)y Prochilodus magdalenae (abajo)	77
6.1. peril en 3D y 2D del sitio Traslase	81
6.2. Mapa del hábitat característico para el tramo traslase	83
6.3. WUA-Tramo Traslase	84
7.1. Evolución de la generación de ISAGEN y la participación en la generación neta de cada una de sus centrales.	86
7.2. Evolución del precio de bolsa 2006 - 2010	87
7.3. Evolución de la demanda doméstica de electricidad en GWh/año 1995 - 2010. . .	87
7.4. Ciclo anual de caudales de la zona de estudio.	88
8.1. Índices de idoneidad para el sitio Traslase	93
8.2. Series de tiempo realizadas con las funciones de idoneidad	94
8.3. Serie de tiempo ponderada por media geométrica	95
8.4. Serie de tiempo ponderada asignando colores a valores medios, máximos, mínimos e intermedios	95
8.5. Código de colores en los valores máximos, medios, mínimos e intermedios para el análisis estadístico posterior	95
8.6. Función de excedencia para indicadores de idoneidad particulares bajo diferentes políticas de manejo del agua y varias ponderaciones.	96
8.7. Probabilidad de resiliencia.	97
8.8. Delta del intervalo de confianza, $Z_{1-\alpha/2}S_t$	97

8.9. Políticas ambientales para dejando 3.25, 2 y 1.5 m ³ /s	98
8.10. Planes de generación evaluados.	98
A.1. Hietograma precipitación total y efectiva para la subcuenca Traslase.	103
A.2. Hietograma precipitación total y efectiva para la subcuenca La Sonrisa.	104
A.3. Hietograma precipitación total y efectiva para la subcuenca La Samaria.	105
A.4. Hietograma precipitación total y efectiva para la subcuenca Cadenales.	106
A.5. Hietograma precipitación total y efectiva para la subcuenca La Risaralda.	107
A.6. Hidrogramas de precipitación efectiva para la subcuenca Traslase.	108
A.7. Hidrogramas de precipitación efectiva para la subcuenca La Sonrisa.	109
A.8. Hidrogramas de precipitación efectiva para la subcuenca La Samaria.	110
A.9. Hidrogramas de precipitación efectiva para la subcuenca Cadenales.	111
A.10. Hidrogramas de precipitación efectiva para la subcuenca La Risaralda.	112
B.1. peril en 3D y 2D del sitio Traslase	114
B.2. peril en 3D y 2D del sitio La Samaria	115
B.3. peril en 3D y 2D del sitio Cadenales	116
B.4. peril en 3D y 2D del sitio La Risaralda	117
B.5. Peril en 3D y 2D del sitio La Risaralda	118
B.6. Peril en 3D y 2D del sitio Remolinos	119

Índice de Tablas

3.1. Diferentes denominaciones y conceptos de caudal ambiental	9
4.1. Puntos de cierre de las subcuencas, en coordenadas planas con origen Bogotá . .	18
4.2. Generalidades de las estaciones hidrológicas utilizadas (ISAGEN S.A., CHEC, IDEAM y FNC)	18
4.3. Parámetros morfométricos de las subcuenca del río Manso	21
4.4. Tiempos de concentración en la cuenca de las subcuencas.	21
4.5. Tiempos de concentración seleccionados.	22
4.6. Intensidades y precipitaciones totales en las subcuencas de estudio	24
4.7. Números de Curva para Escorrentía con humedad antecedente AMC II (SCS, 1986)	26
4.10. Coeficiente de escorrentía para las subcuenca de río Manso.	26
4.8. Datos de salida de Arcgis para el cálculo del CN en la subcuenca Traslase. . . .	27
4.9. Resumen de los CN para cada una de las subcuencas.	27
4.12. Caudales máximos para la subcuenca La Sonrisa (m^3/s)	27
4.11. Caudales máximos para la subcuenca Traslase (m^3/s)	28
4.13. Caudales máximos para la subcuenca La Samaria (m^3/s)	28
4.14. Caudales máximos para la subcuenca Cadenales (m^3/s)	28
4.15. Caudales máximos para la subcuenca La Risaralda (m^3/s)	28
4.16. Caudales máximos para la subcuenca La Punta (m^3/s)	29
4.17. Caudales máximos para la subcuenca Remolinos (m^3/s)	29
4.18. Caudales máximos para la subcuenca Entrega (m^3/s)	29
4.19. Caudales medios (m^3/s) en las cuencas de estudio.	37
4.20. Precipitación media en las cuencas de la zona de estudio	43
4.21. Rangos establecidos para los parámetros del modelo.	44

4.22. Parámetros de calibración de cada uno de los modelos.	45
4.23. Errores de ajuste calculados para el modelo de tanques.	46
4.24. Caudal de 90 % (m^3/s)	46
4.25. Factor de frecuencia para caudales mínimos de la distribución tipo Gumbel . . .	47
4.26. Valores críticos para el coeficiente de asimetría	48
4.27. Análisis de frecuencias caudales mínimos instantáneos	49
4.28. Parámetros $\hat{\mu}_{Q_{min}}$ y $\hat{\sigma}_{Q_{min}}$ y resultados de regionalización para caudales mínimos (m^3/s)	51
6.1. Condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo para cada uno de los tramos simulados en HEC-RAS	80
6.2. Coeficiente de rugosidad de Manning para cada uno de los tramos simulados en HEC-RAS	80
6.3. Hidrometría sección Traslase	81
6.4. Descripción de la caracterización fluvial del tramo.	82
6.5. Evaluación de hábitat para el sector trasvase	82
B.1. Características hidráulicas del tramo Traslase	114
B.2. Características hidráulicas del tramo La Samaria	115
B.3. Características hidráulicas del tramo Cadenales	116
B.4. Características hidráulicas del tramo La Risaralda	117
B.5. Características hidráulicas del tramo La Punta	118
B.6. Características hidráulicas del tramo Remolinos	119

Capítulo 1

Generalidades

1.1. Introducción

La pretensión de que el caudal natural de un río debe reservarse íntegramente para el perfecto funcionamiento del ecosistema acuático resulta una utopía en la actualidad. El único planteamiento que parece realista para gestionar el agua superficial racionalmente es compaginar sus distintos usos, asegurando en todo momento un estado aceptable del ecosistema fluvial.

Fomentar y garantizar la gestión integrada del caudal ambiental es necesario, como también el desarrollo y formulación de normas y políticas de manejo del agua, que restrinjan la alteración y el uso del recurso hídrico, en aras de lograr un equilibrio con el manejo del ecosistema (Agualimpia y Castro, 2008). De esta manera, existe en el contexto latinoamericano la “Estrategia para el manejo integrado de los recursos hídricos”, formulada por el Banco Iberoamericano de Desarrollo (BID, 1998). La estrategia es un marco de gestión que puede adaptarse a las necesidades propias de cada país, y su objetivo principal es la conservación del agua mediante el uso de métodos eficientes para asignar el recurso.

En Colombia, el marco de manejo de los recursos hídricos está formulado por distintas normativas: La Constitución Política de 1991, que en su artículo 8 habla de la intervención del Estado sobre el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales renovables; el Código Nacional de Recursos Renovables Decreto-Ley 2811 de 1974, donde se plantea que tanto el Estado como los particulares deben procurar preservar, mediante un manejo adecuado, los recursos naturales; el Decreto 1541 de 1978, que complementa el Decreto Ley 2811 de 1974, específicamente para el caso del agua en todos sus estados; el Decreto 1594 de 1984, que igualmente complementa el Decreto-Ley 2811 de 1974, señala la obligación de formular un Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico para destinar el agua a diferentes usos; y los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), específicos para cada río, entre otras leyes específicas a cuerpos de agua particulares (Cantera, *et al.* 2009). El desarrollo de todas estas normativas es supervisado por la entidad gubernamental superior del que fuere el Ministerio de Ambiente, y que en la ac-

tualidad es el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), junto con otras entidades delegadas como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), y las Corporaciones Autónomas Regionales

Más recientemente, el proyecto de la Ley del Agua en Colombia busca reglamentar los usos y el aprovechamiento del recurso hídrico, así como la regulación de caudales que permitan la conservación de ecosistemas asociados a los ríos y las especies que los habitan (Agualimpia y Castro, 2008). No obstante esto, aún no existe una metodología reglamentada en Colombia para definir caudales ambientales, aplicable a todas las corrientes del país (Agualimpia y Castro 2006). Esto puede conllevar a la aplicación de distintos métodos de estimación de caudales ambientales (unos menos exigentes que otros), que generan diferentes alteraciones sobre las corrientes en las que son aplicados.

Partiendo de la premisa que los caudales ambientales se calculan para la protección y conservación de especies dentro de una corriente de agua con potencial hidroeléctrico u otros usos, es supremamente relevante conocer y estudiar los requerimientos mínimos de intrínseca variabilidad de preferencia de hábitat de los organismos que se van afectar y no asumirlos. Para de este modo, generar políticas ambientales que los tengan en cuenta y no solo calcular el caudal ecológico por medio de métodos hidrológicos e hidráulicos, si no teniendo claro una imagen global de su parte ecológica, económica y social. Por ello, son diversos los métodos utilizados en esta metodología holística de 7 pasos en los cuales se incluye reducir la incertidumbre de los datos y la información hidrológica y económica, como la variabilidad e incertidumbre de la información y conocimiento ha cerca de las especies encontradas en el sitio de afectación, las cuales son motivos de estudio detallado en la presente investigación.

1.2. Justificación

La cantidad y frecuencia de los caudales circulantes son unos componentes esenciales que determinan la calidad del agua, la capacidad de abastecimiento y la integridad ecológica del ecosistema de ribera. De hecho, el caudal está íntimamente relacionado con los procesos geomorfológicos, físicos, químicos y biológicos del ecosistema, por lo que se considera una variable fundamental que condiciona la distribución y la abundancia de las especies y regula su estado ecológico (Power *et al.*, 1995; Resh *et al.*, 1998). Las metodologías de estimación de caudales ambientales aplicadas en Colombia son: el Caudal Mínimo para el Sostenimiento de Ecosistemas, formulado en el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2000); la reducción por caudal ecológico de la metodología para determinar el Índice de Escasez para Aguas Superficiales, descrita en la Resolución 865 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT, 2004); la Metodología propuesta para la estimación del caudal ecológico de la Secretaría Ejecutiva del Convenio Andrés Bello (SECAB, 2005); la Metodología para la Estimación de Caudales Ambientales en Proyectos Licenciados, formulada mediante un convenio entre la Universidad Nacio-

nal de Colombia y el MAVDT (Erasmus *et al.*, 2007); y la Propuesta Metodológica de cálculo de caudal ambiental para ríos pequeños y quebradas, formulada por el ingeniero Abraham Salazar para el IDEAM (Salazar e IDEAM 2009). Entre estas metodologías hay de tipo hidrológico, hidráulico, asesoría de panel de expertos y holísticas, lo cual reafirma la importancia de estudiar el efecto de aplicar estas metodologías en una fuente hídrica reduciendo la incertidumbre y variabilidad con diferentes métodos y diversos elementos de cuantificación de incertidumbre hidrológica. Elementos como análisis de consistencia y homogeneidad, intervalos de confianza, curva de duración de caudales diarios y análisis test de resiliencia o recuperación.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Constituir un modelamiento y manejo entre las interacciones hidrológicas, ecológicas y económicas para la conservación de los ecosistemas asegurando al mismo tiempo su fiabilidad de servicio económico.

1.3.2. Objetivos específicos

- Hacer una revisión del estado del arte sobre métodos y metodologías para la estimación de caudales ecológicos.
- Generar un análisis hidrológico de los registros de caudales mensuales y precipitación.
- Construir un estudio ecológico a través de los trabajos realizados por las Universidades (Universidad Nacional de Colombia – Universidad de Antioquia), e información del modelo PHABSIM e ISAGEN S.A.
- Generar un análisis económico por medio de los ingresos, precio kilovatio/hora y la capacidad instalada de la empresa generadora de energía.
- Modelar las interacciones hidrológicas, ecológicas y económicas para diferentes escenarios. Explotación piscícola, usos del agua y generación de energía.
- Calcular caudales mínimos para la especie *Ichthyoelephas longirostris* (Patalo), mediante la metodología IFIM.
- Correlacionar los datos obtenidos para optimizar el trasvase hacia la central hidroeléctrica miel I.

Capítulo 2

Metodología Propuesta

Desde 1970, principalmente en Estados Unidos, Europa, Sudáfrica y Australia, ha habido una evolución en las metodologías para valorar los requerimientos de caudal ambiental de los ecosistemas fluviales. Históricamente y aún en la actualidad, el enfoque dado para valorar el caudal ambiental ha sido el de mantener la pesca en agua dulce debido a su importancia para la economía de algunas regiones. En Norteamérica se desarrollaron metodologías donde se encontraban los caudales necesarios para el mantenimiento, el desove y la cría de especies objeto (especialmente el salmón). La suposición inherente en las primeras metodologías desarrolladas era que el caudal que mantiene la población, hábitat y actividades del pez objeto, mantendría todo el ecosistema fluvial. Sin embargo, el campo se ha expandido e incluye la valoración de otras necesidades de la biodiversidad biótica, aspectos de la estructura del ecosistema, tales como la forma del canal, la vegetación riparia, los humedales y las llanuras aluviales (Tharme, 1996), (King *et al.*, 1999), (Davis y Hirji, 1999).

Es así como las metodologías pueden variar desde enfoques de escritorio basados en la información existente, a aquellas que incluyen una recopilación de información intensa y sofisticada con el uso de software especializado. La mayoría de los enfoques se pueden usar tanto en ríos regulados como en aquellos no regulados, aunque algunas metodologías han sido desarrolladas especialmente para el caso de la restauración de ríos (obviamente regulados).

La metodología empleada para desarrollar este trabajo es la metodología holística propuesta por (Daniel P. Loucks, 2006). Basado en 7 puntos de aplicación. Se escogió esta metodología por que integra tres o más fuentes de información para llegar a un caudal ambiental donde los profesionales en el campo ambiental, la comunidad, la autoridad ambiental y las empresas interesadas en el recurso deben estar de acuerdo con los datos, procesos y resultados obtenidos. Es una metodología que emplea los requerimientos o preferencias de las especies in situ, para optimizar el proceso de cálculo de caudal ambiental logrando una verdadera conservación y protección de los especímenes encontrados en la fuente hídrica. A continuación se muestran cada uno de los pasos contenidos en la

metodología holística de (Daniel P. Loucks, 2006).

1. Identificación de los indicadores de los sistemas y sus unidades: energía, agua potable, navegación. Estos deben reflejar el funcionamiento del ecosistema y las interacciones: hidrológicas, económicas y ecológicas.
 - a. Interacciones Hidrológicas: Caudales diarios, calidad del agua, confiabilidad, precipitación.
 - b. Interacciones Ecológicas: Hábitat de idoneidad para la(s) especie(s) objetivo con los resultados del software IFIM
 - c. Interacciones Económicas: Ingresos y confiabilidad de la empresa, precio kilovatio/hora, capacidad instalada de la empresa.
2. La identificación de los atributos (a veces llamados estrés) que afectan cada uno de estos indicadores u objetivos en espacio/tiempo.
 - a. Interacciones Hidrológicas: Caudales máximo, Caudales mínimo, Caudales medios, contaminación.
 - b. Interacciones Ecológicas: Especies con valor comercial, sitios de desove, sitios de refugio.
 - c. Interacciones Económicas: Oferta energética, tasas de extracción de pesca.
3. Identificación de la relación funcional entre cada indicador seleccionado u objetivo y su atributo hidrológico. Este paso en el proceso de evaluación requiere de especialistas o expertos en cada indicador. La participación de los interesados es fundamental para obtener diferentes enfoques que contribuyan en el proceso de modelación.
4. Generación de las series de tiempo de los indicadores relacionados con el aprovechamiento del agua. Simulaciones hidrológicas o hidráulicas generarán la serie de tiempo de variables hidrológicas como flujos, velocidades, profundidades, calidades de agua, etc. Estos entonces pueden ser combinados, siempre y cuando sea necesario, para obtener las series de tiempo hidrológicas atributo de los valores de las variables.

Simulaciones entre las funciones elegidas en el paso 3.
5. Generación de indicadores en el tiempo y en el espacio. Medias geométricas, media aritmética ponderada, y el máximo o mínimo de los valores, son sólo algunas de las maneras de obtener una modelación de indicadores.
6. Recopilar, graficar y comparar los indicadores de varias funciones. Es una labor que se realiza, convirtiendo un compuesto de series de tiempo en una función de excedencia

Se establecen umbrales para identificar las zonas de valores de los indicadores de las variables y asignar un color a cada zona, como en la figura 2.1. El mapa con

los códigos de color muestran los valores de los indicadores de las variables y las gráficas se utilizan para resumir y mostrar los datos.

Este mapa de colores codificados es dinámico, mostrando cambios a lo largo del tiempo. Como la medida de la fiabilidad, resistencia y vulnerabilidad de algunos o todos indicadores de las funciones, estos cambios pueden ser calculados y mostrados.

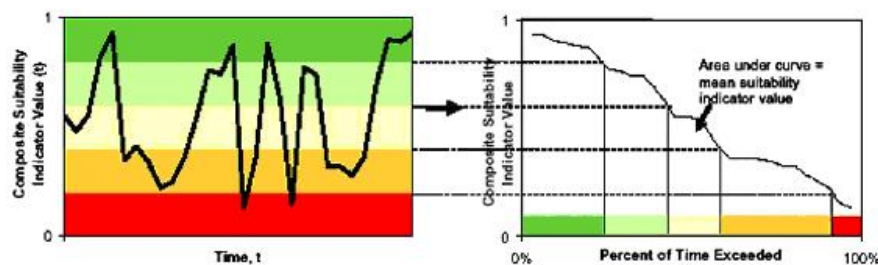


Figura 2.1: Figura tomada de Loucks et al, 2006

7. Sensibilidad e incertidumbre de la metodología. Teniendo la modelación como es la respuesta a la estimación de los caudales ambientales ante cambios en los indicadores, hidrología y relaciones funcionales.

Capítulo 3

Algunos Métodos de Determinación de Caudal Ecológico

3.1. Introducción

La creciente demanda social de un medio ambiente mas limpio ha impuesto en la planificación hidráulica la consideración de que en los cauces regulados circulen, al menos, unos “caudales ecológicos” o “caudales mínimos medioambientales”, para lograr un sistema que mejore el hábitat para los peces, las aves, la flora y aún proporcionar energía hidroeléctrica y el agua para uso doméstico, agrícola e industrial. Esta paradoja de rehabilitar ecosistemas asegurando al mismo tiempo su fiabilidad de servicio económico es un desafío principal para el futuro previsible. En la literatura técnica existe un buen número de métodos para definir el caudal ecológico, pero se fundamentan en resultados y experiencias concretas en ríos y con las especies biológicas de control estudiadas en cada caso en particular, por lo que la mayoría de los métodos aplican para las fuentes de agua estudiadas y pueden tener ninguna o limitada aplicabilidad para otras corrientes, en especial de condiciones ambientales diferentes. En este capítulo se clasifican en dos grupos los métodos y criterios recopilados, uno de los cuales determina el caudal ecológico en forma cuantitativa y el otro de forma cualitativa, refiriéndose éste a la conservación del caudal por la preservación del paisaje o por fines recreativos. A continuación se presenta una revisión de los métodos cuantitativos.

3.2. Caudal ecológico

El desarrollo económico ha llevado a alterar el estado natural prístino de fuentes hídricas, desde entonces han surgido también los conceptos de caudal ecológico y caudal ambiental. En la literatura se encuentra una amplia y extensa gama de definiciones y denominaciones propuestas por diferentes autores o normas (Tabla 3.1; (Carvajal, 2007)). El

caudal ecológico podría definirse como el flujo de agua requerido para mantener las necesidades mínimas de los ecosistemas acuáticos existentes en un área de influencia antrópica que modificará los caudales naturales de un río o quebrada. Los caudales ecológicos son escurrimientos que se dejan fluir por el río para preservar la integridad ecológica sin menoscabo del desarrollo de los habitantes.

3.3. Métodos cuantitativos

La selección de la metodología o metodologías más apropiadas en cada caso depende de muchos factores, incluyendo los objetivos y requerimientos técnicos establecidos por la normativa, la adecuación a las características hidrológicas y ambientales del sistema fluvial objeto de análisis, la escala de trabajo y la cantidad y calidad de los datos disponibles. En cualquier caso, es importante aplicar metodologías suficientemente contrastadas y validadas por la comunidad científica, de forma que los resultados que se deriven en cuanto al régimen de caudales aconsejado permitan cumplir de forma efectiva con los objetivos ambientales perseguidos. En este sentido uno de los elementos de valoración, en conjunción con otros muchos, es el respaldo científico de las distintas metodologías propuestas. Existen aproximadamente 30 métodos diferentes (Carreno, 2008), los cuales se han agrupado en cuatro grandes tipos de enfoques metodológicos, con algún grado de aceptación, para fijar los caudales ecológicos o de mantenimiento, que se aplican de acuerdo con el país donde se usen y los intereses que se pretendan: Hidrológico, Hidráulico, de Simulación de Hábitat y Holístico.

Uno de los métodos se basa en las series hidrológicas históricas del río y se conoce como Método Hidrológico. El segundo método se fundamenta en la simulación hidráulica del río y se conoce como Método Hidrológico – Biológico; algunos de los criterios de estos dos métodos son bastante restrictivos en cuanto a sus exigencias de caudal mínimo, tanto que de entrada eliminan toda posibilidad técnica y económica de adelantar cualquier proyecto en nuestro medio, pues fueron desarrollados para unas condiciones específicas muy diferentes a las nuestras. El tercer método se basa en criterios exclusivamente biológicos y es llamado de Simulación de Hábitat y por último el método holístico tiene una visión global del río. A continuación se mencionan con mayor detalle algunas de estas metodologías. No se pretende incluir todas las que se han desarrollado sino mostrar un panorama de la gran diversidad de técnicas que han surgido, en especial en los últimos años.

3.3.1. Métodos hidrológicos o de caudales históricos

Los métodos hidrológicos o de los caudales históricos se basan en el análisis de las características del régimen hidrológico natural como factor clave en la organización del ecosistema fluvial. En la actualidad, estos métodos son los considerados como más sen-

Tabla 3.1: Diferentes denominaciones y conceptos de caudal ambiental

Denominación	Concepto	Referencia
Caudal Ecológico Mínimo	Es el caudal que restringe el uso durante las estaciones de caudales bajos y mantienen la vida en el río. No aporta una solución ecológica. Se calcula de forma directa y arbitraria, producto de un pacto más que de una formulación científica.	(King <i>et al.</i> , 1999); (Palau 2003)
Caudal Ecológico	Caudal mínimo necesario en una fuente o curso fluvial, para preservar la conservación de los ecosistemas fluviales actuales, en atención a los usos de agua comprometidos, a los requerimientos físicos de la corriente fluvial, para mantener su estabilidad y cumplir sus funciones tales como, dilución de contaminantes, conducción de sólidos, recarga de acuíferos y mantenimientos de las características paisajísticas del medio.	(Ormazabal, 2004)
Caudal de Mantenimiento	Caudal requerido para mantener todas las funciones ecosistémicas del río, incluyendo la incorporación continua y balanceada de las especies acuáticas y riparias. Es un caudal calculado y dirigido hacia la conservación de los valores bióticos del ecosistema fluvial.	(APROMA, 2000)
Caudal Ambiental	Es el régimen hídrico que se establece en un río, humedal o zona costera para sustentar ecosistemas y sus beneficios donde hay usos del agua que compiten entre sí y donde los caudales están regulados. El caudal ambiental es usado para valorar cuanta agua puede quitársele al río sin causar un nivel inaceptable de degradación del ecosistema ribereño en el caso de ríos gravemente alterados. Se considera caudal ambiental la cantidad de agua necesaria para restablecer el río y rehabilitar el ecosistema hasta un estado o condición requerida.	(King & Louw, 1998); (Palau, 1994); (Dyson <i>et al.</i> , 2003)
Caudal de Acondicionamiento	Se refiere a un caudal que puede establecerse como complemento de caudales mínimos o de mantenimiento, para una finalidad concreta, ajena a la conservación de valores bióticos del ecosistema fluvial y referida a aspectos abióticos (dilución, paisaje, usos recreativos, etc.)	(Palau 2003)
Caudal de Compensación	Caudal mínimo necesario para asegurar la supervivencia de un ecosistema acuático preestablecido.	UNESCO (s.f)
Régimen de Caudal Ambiental	Es aquel que permite cumplir con una condición establecida del ecosistema ribereño. En el se detallan caudales específicos en magnitud, periodicidad, frecuencia y duración, tanto de caudales basales como de avenidas y crecientes en la escala de variabilidad intra e interanual, todo ello diseñado para mantener en funcionamiento todos los componentes del ecosistema	(King <i>et al.</i> , 1999)
Régimen de caudal ecológico	La estimación de caudales ecológicos debe formularse para asegurar la integridad del ecosistema fluvial, tomando conciencia de los usos de los recursos hídricos, de las necesidades que se satisfacen, y convertirse así en un instrumento para la reflexión, para la conciliación, para la toma de decisiones: la estimación de caudales ecológicos debe concebirse para ser integrada en un “proceso que promueva el desarrollo coordinado y la gestión del agua, tierra y recursos relacionados, y que permita maximizar el resultado económico y social de una manera equitativa y sin comprometer la sostenibilidad del ecosistema”	(Hirji & Davis, 2009)
Caudales ambientales	Los caudales ambientales son los flujos de agua, el momento de aplicación y la calidad del agua precisos para mantener los ecosistemas de agua dulce y de estuarios, así como los medios de subsistencia y bienestar de las personas que dependen de tales ecosistemas	(Declaración de Brisbane, 2007)

cillos. La mayoría se basa en el cálculo de un caudal mínimo teóricamente suficiente para mantener las características del sistema fluvial, para lo cual se analizan los registros históricos de caudal. Como ejemplos cabe citar el método de Tennant o Montana (Orth & Maughan, 1981) y el Range of Variability Approach (Richter *et al.*, 1997). Con estos métodos, el caudal ecológico se establece a partir del resultado de algún parámetro es-

tadístico supuestamente representativo. En la actualidad, los métodos hidrológicos son los más extendidos a nivel mundial para el cálculo del caudal ecológico de ríos.

Los criterios o variaciones del método hidrológico consultados son los siguientes, para definir el caudal ecológico:

1. El caudal ecológico corresponde al 10 % del valor del caudal medio mensual multi-anual del río¹
2. A partir de curvas de duración de caudales medios diarios, propone como caudal mínimo ecológico el caudal promedio multianual de mínimo 5 a máximo 10 años que permanece el 97.5 % del tiempo y cuyo periodo de recurrencia es de 2.33 años².
3. Se considerará como caudal ecológico el caudal de permanencia en la fuente durante el 90 % del tiempo ³
4. El caudal ecológico corresponde al 25 % de los volúmenes anuales en condiciones de oferta media. IDEAM (2000)⁴.
5. El caudal ecológico se considera el caudal mínimo histórico de la serie hidrológica⁴.
6. El caudal ecológico es el 50 % del caudal mínimo del estiaje del año 95 %.
7. El caudal ecológico es la media de los caudales mínimos mensuales registrados durante una serie de años.

3.3.2. Métodos hidráulicos

Los métodos Hidráulicos, también denominados de segunda generación, incluyen junto a información hidrológica la relativa a la morfología fluvial y al estudio de variables hidráulicas simples como la velocidad, la profundidad y la superficie cubierta por la lámina de agua y su relación con las variaciones de caudal. Uno de los métodos más extendidos el del Perímetro Mojado (línea de contacto entre el agua y el lecho) (Reiser et al., 1989). Este método relaciona el caudal con el perímetro mojado, planteando que el punto de inflexión de la relación perímetro mojado-caudal es el punto donde se maximiza el hábitat usable por las especies.

Otros métodos se basan en transectos múltiples. A diferencia de la técnica del perímetro mojado (utilizado para un único transecto), los métodos de transectos múltiples evalúan varias secciones transversales. En cada una de ellas se miden, bajo diferentes

¹Tomado de la presentación caudal ecológico Abraham Salazar, fundación agua, vida y medio ambiente 2009.

²Estudio Nacional del Agua (2000), Colombia.

³Proyecto Ley del Agua (Proyecto De Ley N° 365 – Cámara de 2005)

⁴Tomado de la presentación “Caudales Ecológicos: Perspectiva desde la dirección general de aguas, Francisco Riestra Gonzáles 2000.

caudales, la velocidad, el nivel, el sustrato y la cobertura. Estos datos se someten a modelación para determinar los cambios en las variables hidráulicas, lo cual da una idea de la “habitabilidad” del río sometido a variaciones de caudal. Estos métodos tienen en cuenta la variabilidad de los caudales y el consecuente cambio de las variables hidráulicas de importancia ecológica. Hay varios métodos de transectos múltiples propuestos para Estados Unidos; algunos miden variables como cobertura vegetal, caudales medios anuales, longitud y área de la sección (Método del Water Resources Research Institute “WRRI Cover”, 1973). Otros determinan velocidad de la corriente, profundidad de flujo y necesidades de hábitat para el ciclo biológico de algunas especies ícticas (Método de Washington, 1974), o velocidad, profundidad de flujo, área de la subsección y tipos de sustrato (Método de California o de Waters, 1976). En el método de Oregón (1980) se mide velocidad, profundidad de flujo y caudal (Aguilimpia y Castro 2006).

3.3.3. Métodos simulación de hábitat

Este método, también llamado de tercera generación, agrupa series históricas de caudal, parámetros morfohidráulicos de diferentes secciones, procesos fisicoquímicos, tróficos y se extrapola hasta su relación con algunas variables biológicas poblacionales (biomasa, densidad, etc.) de especies piscícolas determinadas (específicamente para salmónidos), para definir sus preferencias en cuanto a su hábitat. La deducción de un caudal de mantenimiento a partir de estos planteamientos no resulta tan sencilla y directa como en los métodos anteriores, aunque supuestamente sus resultados ofrecen algunas garantías de adecuación, que no son, sin embargo, muy útiles para ríos en los que la variabilidad temporal de las características de hábitats es inherente. Dentro de esta metodología se encuentran el método basado en la geomorfología propuesto en Australia por (Thoms y Sheldon, 2002) e IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) (Bain *et al.*, 1988); (Reiser *et al.*, 1989), uno de los más ampliamente aplicados para la determinación de caudales ambientales. (Thoms y Sheldon, 2002) plantea los siguientes pasos para el establecimiento de caudales ecológicos.

1. Determinación de la naturaleza física (hábitat) del sistema: A partir de imágenes de sensores remotos, fotografías aéreas, datos históricos y estudios de campo se describe el sistema en múltiples escalas enfatizando e interpretando ecológica y funcionalmente los hábitats físicos dominantes y su conexión.
2. Determinación de los caudales asociados con los principales hábitats físicos y las funciones ecológicas. Estos análisis se hacen en secciones transversales representativas, en las cuales se establece la relación caudal-hábitat.
3. Identificación de conductores hidrológicos claves del sistema ribereño y determinación de las implicaciones del uso de los recursos hídricos. Para esto, se define la firma hidrográfica” del río, la cual depende de la geomorfología, la conectividad longitudinal, los intercambios verticales, la conectividad lateral, los caudales de manteni-

miento de los canales, los caudales mínimos y los caudales estacionales. Mediante modelación se analizan los impactos de la utilización de los recursos hídricos sobre la firma hidrográfica y se establece el comportamiento hidrológico a varias escalas temporales (régimen de caudales a más de 100 años, historia de los caudales entre 1 y 100 años y pulsos de inundación de menos de un año).

4. Establecimiento de opciones de manejo del caudal teniendo en cuenta las características hidrográficas del río para determinar sus opciones de extracción. Aquí es necesario pronosticar si los pulsos de inundación afectarán los niveles de prioridad para la conservación del funcionamiento ecológico y en qué zonas del río ocurrirán. Los pulsos que superen el nivel de prioridad corresponden al caudal que puede ser utilizado en consumo.

El método IFIM, el más citado dentro de esta metodología y cuenta con una valoración positiva en el 90 % de los casos (Carreno, 2008), se ha aplicado en 38 estados de Norte América (Reiser et al., 1989), en Colombia, Australia y varios países europeos (Francisca *et al.*, 2008). Está basado en las relaciones cuantitativas obtenidas por simulación hidráulica, entre los caudales circulantes y los parámetros físicos e hidráulicos que determinan el hábitat biológico por medio de métodos computacionales como (PHABSIM el cual realiza la simulación del hábitat físico o RHABSIM simulación de hábitat fluvial). El Método del Hábitat Potencial Útil (HPU), es una variante del IFIM y busca establecer una combinación de condiciones hidráulicas (velocidad – profundidad), características del cauce (sustrato y cobertura) y características del agua (temperatura), óptimas para cada especie y estado de vida a lo largo del ciclo hidrológico anual.

Antes del desarrollo de la modelación se identifican los objetivos y límites del estudio y se realiza la tipificación e inventario de los diferentes hábitats eco-hidráulicos. Para estos fines el hábitat se define como un área relativamente homogénea en cuanto a velocidad, profundidad y tipo de sustrato. El inventario de hábitats se realiza mediante el levantamiento topográfico de secciones transversales (Díez y Burbano, 2006). El esquema conceptual de dicha metodología parte de cinco puntos básicos:

Modelo de hidráulica fluvial: Con base en los caudales circulantes se establecen relaciones con parámetros como: Profundidad, velocidad del flujo, ancho del cauce inundado y granulometría del sustrato del cauce.

Curvas de preferencia de la fauna: En este esquema se ubican las distintas especies identificadas en el cauce y se establece su relación con los parámetros físicos definidos en el cauce para cada caudal circulante. Los investigadores establecieron unas Curvas de Preferencia para las especies adultas, con énfasis en los salmónidos, en donde se normalizaron para mayor comodidad en una escala de cero (0) a uno (1.0), definiendo como valor cero el parámetro en condiciones intolerantes para el desarrollo de la especie y valor uno para aquellos valores del parámetro hidráulico que resulta óptimo para la especie.

Valor potencial del hábitat fluvial: El río, en la sección transversal, se divide en celdas diferenciales, en las que para determinado caudal circulante existe una profundidad media (P_i), una velocidad media (V_i), y un tipo de sustrato determinado (S_i). Las curvas de preferencia dan unos valores de preferencia para cada parámetro, que son $C_i(P_i)$, $C_i(V_i)$ y $C_i(S_i)$. El producto de ellos es un indicador del valor de cada celda como hábitat potencial y la integración de dicho valor en todas las celdas de una sección transversal del río, ponderándolas por la superficie que representan, define el valor potencial del hábitat fluvial útil (WUA).

Modelación hidráulica: El módulo hidráulico describe la distribución espacial de atributos del sistema tales como la profundidad, la velocidad y el tipo de sustrato. Éste realiza simulaciones hidráulicas de secciones definidas en un tramo de corriente, con las cuales se predice secuencialmente las profundidades y velocidades dentro de un rango de caudales definido. Las simulaciones de las profundidades se pueden desarrollar por tres modelos de régimen permanente. El primero es un método estadístico común relacionando una serie de caudales y niveles tomados en campo (STGO), el segundo está indicado para un régimen de flujo uniforme (MANSQ) y por último para un flujo gradualmente variado (WSP).

Modelación del hábitat: PHABSIM cuenta con un módulo para la simulación de hábitat físicos, en el cual, si se dispone de información sobre preferencias físicas para organismos específicos (en zonas templadas se han desarrollado curvas de aptitud del hábitat para varias especies de salmón y trucha), el modelo permite evaluar la disponibilidad de hábitat para diferentes escenarios alternativos de alteración del caudal.

La modelación del hábitat realizada por PHABSIM transforma la información sobre estructura del canal, los niveles de agua modelados y las velocidades en un índice de cantidad y calidad del hábitat disponible, usando Curvas de Preferencia del Hábitat (HSC) como la función de transferencia. Éste índice de hábitat es luego referido a un Área Ponderada Útil (WUA-Weighted Usable Area) para cada sección transversal, la cual es posteriormente sumada para obtener un Área Ponderada Útil para cada especie de organismo en todo el tramo objeto de estudio y para un caudal dado. Esto permite crear relaciones entre un rango de caudales y la disponibilidad de hábitat para el organismo objetivo en toda el área de estudio.

Existen dos tipos generales de modelación del hábitat disponibles en PHABSIM, los cuales están basados en las condiciones promedio de todo el canal (Average Parameter Model) o en la distribución explícita de la velocidad, la profundidad y el tipo de sustrato a través de toda la sección transversal (Distributed Parameter Models).

En adición a estas dos categorías, hay una tercera clase de modelación, que incluye la determinación o evaluación del hábitat físico efectivo y está compuesta de dos programas, el HABEF y el HABTAM. El primero es utilizado para determinar la disponibilidad de hábitat físico considerando dos flujos; en otras palabras, el

hábitat que permanece efectivo cuando dos flujos son de importancia. En el segundo programa el hábitat efectivo se define como aquel que permanece disponible cuando las especies son forzadas a moverse en la sección transversal debido a fluctuaciones del caudal.

Requerimientos de información

Estructura del canal: Levantamientos topográficos detallados de secciones transversales de los microhábitat donde se identifique la geometría del canal, además de la descripción de la composición de sustrato y la cobertura de vegetación.

Información hidráulica: Levantamiento de medidas de nivel del agua y distribución de velocidades para su respectivo caudal en cada sección transversal. Se recomienda como mínimo tres juegos de mediciones de profundidades y un juego de distribución de velocidades para asegurar una buena flexibilidad de la modelación hidráulica.

Selección de organismos objetivo: Se deben seleccionar las especies (normalmente peces) y los estados de vida de éstas que serán potencialmente indicadoras de la disponibilidad de hábitat, de acuerdo al cambio del régimen de flujo del sistema.

Curvas de adaptabilidad de los organismos: Se deben definir condiciones favorables de microhábitat para las especies objetivo, es decir, elaborar curvas de adaptabilidad de los organismos con respecto a variables como la velocidad, la profundidad y el sustrato. Estas curvas se pueden elaborar con trabajos de campo bien elaborados, transfiriendo curvas existentes o con una combinación de las dos.

3.3.4. Métodos Holísticos

Finalmente los métodos Holísticos constituyen una aproximación a una visión global del río, basada en la Teoría de Ecosistemas Fluviales, en la que los caudales son el soporte básico para el ecosistema fluvial. Es la metodología que más volumen de información requiere y la más compleja y detallada y entre los ejemplos se pueden citar la Building Block Metodology (BBM) (Palmer, 1999) y la Downstream Response to Imposed Flow Transformatio (DRIFT) (King *et al.*, 2003).

3.3.5. Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyecto licenciados

La bibliografía más reciente en nuestro país corresponde al Grupo GIREH (Grupo de investigación en ingeniería de los recursos hídricos. Ingeniería de la Universidad Nacional Sede Bogotá), (Erasmus *et al.*, 2007) “Informe Final del Contrato y del Plan de trabajo detallado aprobado por parte del MAVDT para el desarrollo de proyectos licenciados,

el cual contiene la propuesta metodológica para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieran licencia en Colombia.

La Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, realizó una propuesta inicial de criterios, lineamientos y orientaciones y una propuesta técnica por orden de la Dirección de Licencias una revisión para la estimación y evaluación detallada y crítica de metodologías existentes utilizadas a nivel nacional y mundial para la estimación del caudal ambiental. Además de esto, la revisión de la información biológica, hidrológica, hidráulica y de calidad de agua disponible en trece (13) proyectos licenciados por el MAVDT en Colombia, y los criterios y metodologías de determinación del caudal ambiental que se han aplicado por diferentes consultores y empresas en estos proyectos.

A nivel general considera que la propuesta metodología para estimar y evaluar el caudal ambiental debe cumplir con criterios de objetividad (sin convertirse en una receta, y promoviendo la incorporación del conocimiento de los diversos actores, debe poder ser aplicada de la manera más objetiva posible); flexibilidad (posibilidad de ser aplicada con algún grado de ajuste bajo diferentes condiciones de información y en diversos tipos de corrientes); adaptabilidad (resaltando la necesidad de realizar monitoreo, seguimiento y ajuste continuo de las estimaciones y de la propuesta metodológica en caso de considerarse necesario a partir de evaluaciones periódicas de índices de estado biótico); costo-efectividad (entendida como el adecuado balance entre la eficacia de la metodología y su sostenibilidad); ecosistémicos y de integralidad (considerando la necesidad de incorporar en los análisis los componentes hidrológico, hidráulico, de calidad de agua, biótico, socioeconómico, etc.); precaución ambiental (manteniendo prudencia ante el claro desconocimiento de nuestros ecosistemas y las limitaciones de información existentes en el contexto colombiano); parte integral del componente del marco normativo y de gestión ambiental (entendidos éstos como instrumentos ambientales que son el nicho propicio para la determinación de los caudales ambientales); y obviamente con fundamento en criterios científicos sólidos (pretende ser un instrumento técnico que permita mejorar los Términos de Referencia de requerimientos de información y metodología a seguir para la definición y evaluación de un caudal ambiental en proyectos que requieran licencia).

Cabe señalar que al implementar esta metodología holística del MAVDT nos encontramos con una inconformidad entre las personas que aplican esta metodología en la actualidad, al referirse a ésta como una metodología que requiere de muchos datos que al final poco se utilizan, la obtención de dichos datos requiere una inversión económica muy alta. En otros casos particulares se menciona la discrepancia que tiene la metodología de calcular caudales ambientales con hidrología sin ecología, caudales independientes también a la calidad de agua. Utilizándose métodos estadísticos en las series de tiempo que suponen un caudal ecológico de permanencia en el tiempo, sin conocer los requerimientos de las especies, éstos solo los asumen por diversas tablas con porcentajes. También menciono el lineamiento que tiene la metodología del ministerio en cuanto evaluación con y sin proyecto logrando con esto descubrir la alteración ecológica de los organismos acuáticos, no la conservación y protección de los mismos.

Debido a esto, a continuación se presentan los capítulos en los cuales se basa la metodología holística de 7 pasos, con la cual se conciliará tres importantes entes como lo es la hidrología, la ecología y la economía, se desea obtener caudales que protejan verdaderamente a los organismos que se encuentran en sitios afectados antropicamente en el país y reducir la incertidumbre de datos y procesos para llegar a determinar un caudal ambiental. Para llegar a esto, es necesario realizar un análisis hidrológico completo, calculando caudales máximos para saber las proporciones del diseño de las estructuras hidráulicas que soporten estos caudales y conocer así, el caudal que moldea las características morfológicas del río en diferentes periodos de retorno, lo cual también es importante ya que conocer estos caudales ayuda a formular avenidas programadas para implementarlas en el régimen de caudales ecológicos que ayude a conservar ciclos de vida de la biota en el transecto afectado. Los caudales medios corroboran el potencial del flujo para la generación de energía. Los caudales mínimos dan una idea de la cantidad de agua que se debe de conservar para no afectar irrevocablemente el hábitat de las especies que se encuentran en el tramo afectado.

Se hace también un análisis ecológico del área afectada en tres categorías información secundaria, toma de datos y/o observación directa bajo el agua si es posible, con el cual se describen las preferencias de las especies observadas logrando determinar en pequeña escala (sección transversal) y media escala (transecto o área afectada) o gran escala (área de la cuenca) donde se refugia, donde permanece aguas lentas o rápidas y grandes o pocas profundidades, donde se alimenta, que sustrato prefiere, bajo que condiciones se reproduce lo cual va compaginado con la calidad del agua, ciclo de vida completo de los organismos si el proyecto es ambicioso. Con este análisis se genera información de especies (peces, macro-invertebrado, plantas, entre otros) lo que generaría bancos de información de especies dulce acuícolas en el país.

Por último un análisis económico de la región y de la empresa interesada en la generación o alteración del caudal, se pueden determinar si en el sitio se encuentras especies con valor comercial, sitios de pesca, sitios de comercialización, capacidad de generación, precios de generación, capacidad instalada, afectaciones climáticas que afectan los precios de generación, cantidad de agua disponible, cantidad de agua para ganadería, industria, consumo humano, entre otras variables que pueden ser incluidas o no, de acuerdo a las necesidades de los interesados.

Por último esta información se modela o se procesa por modelos matemáticos y estadísticos para encontrar un umbral de caudal mínimos, el cual no deberá sobrepasar ninguna política de gestión de agua, datos basados en grupos de expertos y en modelos computacionales reconocidos en el campo científico (HEC-RAS, ARGIS, HIDROSIG, SURFER, PHABSIM, entre otros). Se hace una simulación para los caudales mínimos (caudal hallado, propuesto por la empresa y mínimo multianual) y por último se analizan dos casos de caudal ambiental, el primero impuesto por el MAVDT, el segundo el sugerido por la empresa ISAGEN S.A. y se proponen políticas alternativas para lograr una conciliación entre las partes interesadas.

Capítulo 4

Hidrología

4.1. Introducción

En este capítulo se presenta el estudio hidrológico de río Manso, en límites de los municipios de Norcasia y Samaná, en el departamento de Caldas. El estudio comprende el cálculo de caudales máximos, medios y mínimos para diferentes periodos de retorno en ocho subcuencas denominadas Trásvase, La Sonrisa, La Samaria, Cadenales, La Risaralda, La Punta, Remolinos y la Desembocadura al río Miel, las cuales hacen parte de la cuenca del río Manso, los sitios donde se determinaron los caudales se encuentran descritos en la tabla 4.1. Para el cálculo de los caudales máximos se emplearon las metodologías de los hidrogramas unitarios sintéticos de Snyder, SCS y Williams y Hann, además del Método Racional para las subcuencas con el fin de disminuir la incertidumbre de los resultados. Para la estimación del caudal medio en las subcuencas se utiliza la metodología del Balance Hidrológico a largo plazo, por último para caudales mínimos se emplea el análisis de las series históricas, ecuaciones de regionalización de características medias de caudales mínimos para la zona de estudio y un modelo de lluvia-escorrentía para la simulación de caudales diarios.

4.2. Información disponible

4.2.1. Cartografía

Se cuenta con la información cartográfica en mapas digitales de curvas de nivel espaciadas cada 50 m para la zona de estudio ubicada en los límites de los municipios de Norcasia y Samaná.

Sitio	Ubicación	Este (m)	Norte (m)
Trasvase	punto de derivación	902.808,7	1.112.103,1
La Sonrisa	a 0.93 km aguas abajo	903.406,4	1.112.569,7
La Samaria	a 3.7 km aguas abajo	905.197,7	1.113.562,9
Cadenales	a 9.7 km aguas abajo	908.318,2	1.113.486, 6
La Risaralda	a 15.1 km aguas abajo	910.880,3	1.115.946,9
La Punta	a 21.2 km aguas abajo	915.100,0	1.119.080,0
Remolinos	a 28.4 km aguas abajo	921.240,0	1.118.565,0
Desembocadura	a 31.7 km de sitio trasvase	923.515,3	1.117.975,2

Tabla 4.1: Puntos de cierre de las subcuencas, en coordenadas planas con origen Bogotá

4.2.2. Información hidrológica

Para la caracterización climática de las cuencas se utilizó la información de las estaciones presentadas en la Tabla 4.2, datos proporcionados por la empresa ISAGEN S.A., la Centrar Hidroeléctrica de Caldas S.A.S E.S.P (CHEC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y La Federación Nacional de Cafeteros (FNC). Dado que las tramos son adyacentes se optó por utilizar la misma información hidrometeorológica.

Nombre	Código	Municipio	Tipo	Años de Registro	Entidad	Coordenadas	
						Este (m)	Norte (m)
Belén Florencia	4-9022	NORCASIA	PG	45	ISAGEN	894740	1102500
El Bosque	4-9058	NORCASIA	PG	27	ISAGEN	901514	1109266
Trasvase	-	NORCASIA	LM	26	ISAGEN	902808	1112103
Belén san diego	2305035	SAMANA	PM	14	CHEC	905571	1123661
Butantan	2305502	SAMANA	ME	20	IDEAM	922186	1121796
Tendidos 4-9061	2305503	SAMANA	ME	14	CHEC	896330	1118146
Rio manso	2305037	SAMANA	PM	14	CHEC	905555	1112602
Norcasia	2305007	SAMANA	PM	27	IDEAM	911087	1107064
Idema-dorada	2304003	LA DORADA	PM	26	IDEAM	931391	1095980
Nariño	2305001	NARIÑO	PM	20	CHEC	877849	1110804
La palma	2305030	PENSILVANIA	PM	27	IDEAM	885211	1096044
Argelia	2305507	ARGELIA	ME	7	IDEAM	881570	1125545
El tambor	2304501	VICTORIA	PG	20	FNC	909215	1088634
San miguel	2305010	SONSON	LG	17	IDEAM	935121	1130997

Tabla 4.2: Generalidades de las estaciones hidrológicas utilizadas (ISAGEN S.A., CHEC, IDEAM y FNC)

4.3. Caudales máximos

Para el cálculo de caudales máximos para diferentes periodos de retorno en las subcuencas, se emplea la siguiente metodología:

- Construcción de un Modelo Digital de Elevación (MDE) a partir de la cartografía existente.
- Cálculo de los parámetros morfométricos para las subcuencas, en los puntos de cierre de las subcuencas.
- Selección de las estaciones hidrometeorológicas que se emplearán para hacer el estudio.
- Cálculo de la intensidad de la lluvia, distribución de la lluvia en el tiempo y pérdidas hidrológicas a partir de información y estudios existentes.
- Aplicación del método de los hidrogramas unitarios sintéticos y del método racional en las subcuencas.
- Estimación de los caudales máximos en las tramos antes mencionados para los diferentes periodos de retorno.

4.3.1. Modelo digital de elevación (MDE) y parámetros morfométricos

La estimación de los parámetros morfométricos de las cuencas de interés se realizó mediante el uso de la cartografía digital de las curvas de nivel, y con ayuda del software ARC-GIS v9.3 e HydroSIG potenciado por MapWindows. El procedimiento consiste primero en la formación de un mapa definido de curvas de nivel, el cual se formó con todos los mapas disponibles de la zona, que luego mediante una herramienta llamada Topo To Raster que convierte las curvas de nivel en una imagen Raster de altura (modelo digital de elevación, MDE). Luego se utilizó HydroSIG v3.1 y v4.0 para extraer automáticamente las divisorias y los parámetros morfométricos asociados a las subcuencas, después de haber corregido el MDE eliminando zonas planas y sumideros (Ramírez, 2002), procedimiento que también es automático.

La Figura 4.1 muestra el MDE de las subcuencas, en la cuenca de río Manso hasta la entrega al río Miel, se muestra los punto de cierre de cada subcuenca y en la Tabla 4.3 se presentan los parámetros morfométricos asociados a cada subcuenca.

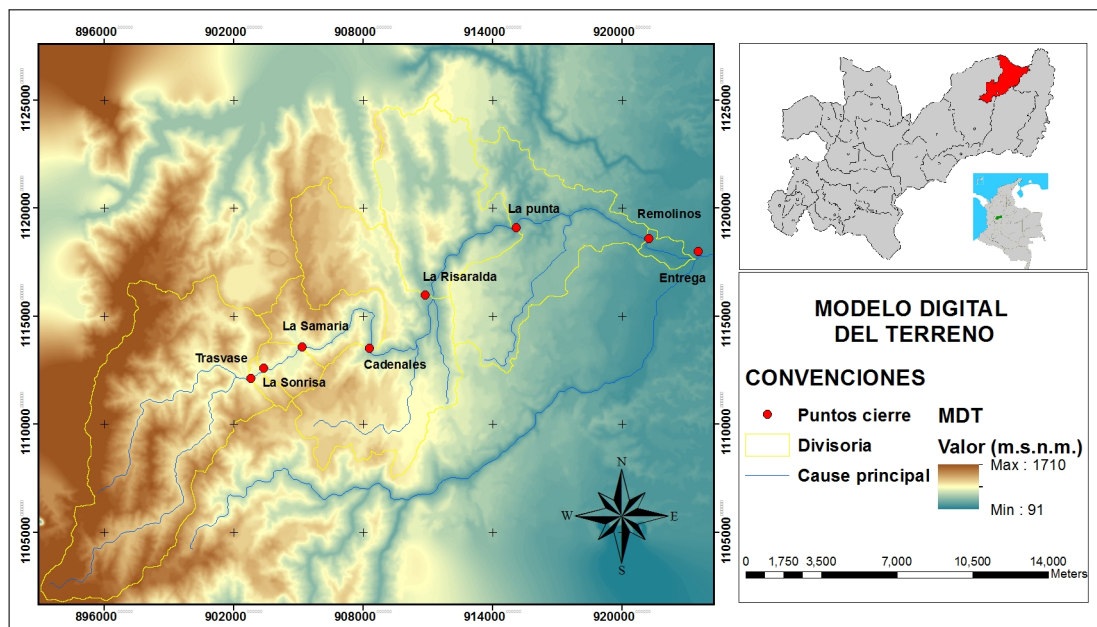


Figura 4.1: MDE de la zona de estudio

4.3.2. Cálculo de los tiempos de concentración

El cálculo de los tiempos de concentración es importante para la aplicación del método de los hidrográmas unitarios, pues en la práctica ingenieril este tiempo se asume igual a la duración de la lluvia sobre la cuenca (Chow et al., 1994).

En la literatura existen múltiples expresiones para el cálculo del tiempo de concentración, entre ellas existen las propuestas por: Temez, Kirpich, Johnstone y Cross, California Couverts Practice (CCP), Giandotti, S.C.S, etc. Sus fundamentos teóricos pueden ser revisados en Campo y Múnera (1997). Debido a las diferentes formas en las que fueron concebidas estas expresiones, la variabilidad en los resultados de una a otra es bastante alta por lo cual se hace necesario escoger el tiempo de concentración de forma apropiada descartando aquellos métodos que no se ajusten a las condiciones morfológicas locales de la cuenca. Esta cuenca no constituye la excepción pues se obtuvieron diferentes tendencias en los resultados del tiempo de concentración, como se puede apreciar en la Tabla 4.4 y en la Figura 4.3.2.

4.3.3. Cálculo de caudales para diferentes periodos de retorno

Se calculan caudales máximos para diferentes periodos de retorno para los sitios de interés utilizando diferentes metodologías, las cuales se describen a continuación.

Parámetro	Trasvase	La Sonrisa	La Samaria	Cadenales	La Risaralda	La Punta	Remolinos	Entrega
Área de drenaje [Km ²]	82.68	84.54	89.75	103.91	162.07	200.37	242.14	244.54
Longitud Total corrientes [Km]	51	51	51	51	51	51	51	51
Cota mayor cuenca [m]	1703.99	1703.99	1709	1703	1709.5	1706.1	1706.14	1703
Cota menor río [m]	617	600	590	424	329	239	200	161
Longitud cauce al centroide [Km]	13.375	14.12	16.057	18.448	22.1 36	27.22	32.019	33.5
Perímetro [Km]	0.062	0.0 36	0.066	0.078	0.108	0.135	0.152	0.158
Pendiente cuenca [%]	45.00	44.71	44	44.1	37.37	36.49	33.52	33.26
Pendiente cauce principal [%]	6.03	5.84	5.30	4.66	4.15	3.70	3.20	3.00
Longitud Cauce principal [Km]	18	18.89	21.172	27.462	33.206	39.59	47	50
Longitud de la cuenca [Km]	62	63.54	65.52	77.94	108.12	13.5	151.92	158.46
Longitud río hasta la divisoria [Km]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Cota menor cuenca [m]	617	600	590	424	329	239	200	161
Cota mayor río [m]	1550	1550	1550	1550	1550	1550	1550	1550

Tabla 4.3: Parámetros morfométricos de las subcuenca del río Manso

Método	Tc															
	Trasvase		La Sonrisa		La Samaria		Cadenales		La Risaralda		La Punta		Remolinos		Entrega	
	horas	min	horas	min	horas	min	horas	min	horas	min	horas	min	horas	min	horas	min
Témez	1.93	115.54	1.95	117.15	2.17	130.20	2.70	161.80	3.18	190.80	3.70	222.00	4.33	259.80	4.59	275.40
Williams	3.58	214.58	3.56	213.40	4.38	262.80	4.91	294.69	5.73	343.80	4.8	288.00	-	-	-	-
Kirpich	1.95	117.03	2.05	122.76	2.32	139.20	2.93	176.03	3.53	211.80	4.20	252.00	5.06	303.60	5.37	322.20
Johnstone y Cross	4.11	246.67	4.24	254.61	4.61	276.60	5.38	323.06	-	-	-	-	-	-	-	-
California	1.81	108.59	1.90	114.13	2.16	129.60	2.77	166.13	3.35	201.00	4.01	240.60	4.84	290.40	5.15	309.00
Giandiotti	2.59	155.59	2.36	158.43	2.81	168.60	3.05	183.18	3.60	216.00	4.00	240.00	4.52	271.20	4.61	276.60
Linsley	4.01	240.72	4.08	244.58	4.66	279.60	-	-	2.01	120.60	-	-	-	-	-	-
Snyder	4.32	259.31	4.46	267.61	-	-	1.90	114.00	-	-	2.15	129.00	2.79	167.40	2.92	175.20
Campo y Múnera	2.17	130.27	2.21	132.57	2.30	138.00	2.47	148.47	2.77	166.20	2.92	175.20	3.18	190.80	3.25	195.00
Ventura Heras	3.59	215.67	3.69	221.40	4.00	240.00	4.53	271.83	-	-	-	-	-	-	-	-
Pérez Monteagudo	-	-	-	-	1.88	112.80	2.59	155.53	3.35	201.00	4.25	255.00	-	-	-	-
Ven Te Chow	-	-	-	-	-	-	-	-	2.60	156.00	3.01	180.60	3.53	211.80	3.7	222.00
SCS Ranser	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.75	105.00	1.80	108.00

Tabla 4.4: Tiempos de concentración en la cuenca de las subcuencas.

Hidrogramas unitarios sintéticos

Este modelo asume que la función de transformación de precipitación en escorrentía al interior de la cuenca, es lineal del tipo convolutiva (Chow et al., 1994). La hidrógrafa unitaria (ó hidrograma unitario) se define como la respuesta de la cuenca en forma de escorrentía directa, que resulta de una precipitación efectiva de profundidad unitaria, uniformemente distribuida sobre la cuenca y de duración específica igualmente unitaria.

En este estudio se determinaron los caudales máximos utilizando tres diferentes hidrógrafas unitarias sintéticas las cuales son: hidrógrafa unitaria de William y Hann, de Snyder, y la del SCS. La filosofía para la construcción de cada una de estas hidrógrafas, así como los parámetros necesarios, y en general la metodología de aplicación del método de las hidrógrafas unitarias puede ser consultado en (Chow et al., 1994).

Hay dos importantes parámetros involucrados en esta metodología, ellos son el histograma de precipitación efectiva y la distribución de la lluvia en el tiempo. Para el cálculo